

УДК 621.316.1.015.3

РАСЧЕТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРИ ПРЕРЫВИСТЫХ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ С РАЗЛИЧНЫМИ РЕЖИМАМИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

В. В. КРОТЕНОК

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Величины перенапряжений в распределительных сетях зависят от многочисленных факторов: режима заземления нейтрали, эквивалентной емкости сети на землю, характера замыкания на землю и т. п. Повышение надежности распределительных сетей представляет собой комплексную задачу, решение которой зависит от состава и режимов работы энергоиспользующего оборудования, протяженности и состояния изоляции кабельных сетей и т. п. Вопрос о наиболее эффективном режиме заземления нейтрали электрических сетей среднего напряжения в основном связан с проблемами ограничения перенапряжений в переходных режимах. От режима заземления нейтрали сети зависят также требования к защите от однофазных замыканий на землю, принципы выполнения и способ ее действия.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в электрических сетях среднего напряжения и часто становятся первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Главными причинами аварий, возникающих вследствие ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, в большинстве случаев являются переходы ОЗЗ в двойные и многоместные замыкания из-за перенапряжений на неповрежденных фазах при дуговом прерывистом характере повреждения [1]–[3, с. 63]. Режим заземления нейтрали в значительной мере определяет характер электромагнитных переходных процессов при пробое изоляции фазы сети на землю и гашении заземляющей дуги, вероятность возникновения и степень опасности перенапряжений при дуговых прерывистых повреждениях. К основным режимам заземления нейтрали сетей среднего напряжения относятся:

- изолированная нейтраль (при ограниченных значениях суммарного емкостного тока сети [4]);
- резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР);
- высокоомное, низкоомное заземление нейтрали через резистор [5].

Существует несколько теорий возникновения и развития перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ [3], [6]. Наибольшие теоретические значения максимальных перенапряжений на нейтрали и на неповрежденных фазах дает модель Петерсена. В соответствии с этой моделью в сетях, работающих с изолированной нейтралью, максимально возможные перенапряжения на неповрежденных фазах оцениваются величиной порядка $4U_{\phi m}$, в сетях с компенсацией емкостных токов ОЗЗ при резонансной или близкой к ней настройке ДГР и в сетях с высокоомным заземлением нейтрали через резистор – $2,4\text{--}2,5U_{\phi m}$ [4], [6]. Поэтому при оценках максимально возможных значений перенапряжений на неповрежденных фазах и соответственно эффективности режима заземления нейтрали электрических сетей 6–35 кВ в части ограничения перенапряжений целесообразно использовать модель Петерсена. Приведенные выше теоретические оценки максимальных значений перенапряжений, возникающих при дуговых ОЗЗ, как правило, получены на упрощенных моделях сети, в которых переходный процесс при пробое

изоляции фазы сети на землю рассматривается как одночастотный. В таких моделях сети не учитывается наличие высокочастотной составляющей в переходном токе ОЗЗ, связанной с разрядом емкостей поврежденной фазы (частота высокочастотной составляющей может находиться от единиц до сотен кГц [3], [7]). Считается, что перенапряжения во всех точках одной фазы электрически связанной сети примерно одинаковы, поэтому измерения перенапряжений, как правило, осуществляются только на шинах, где установлены измерительные трансформаторы напряжения. Перенапряжения в других точках сети, например, в месте пробоя или в конце линий, не исследовались. В то же время опыт эксплуатации реальных сетей 6–35 кВ показывает, что в некоторых случаях максимальные значения перенапряжений при дуговых ОЗЗ, возможно, превышают принятые в настоящее время [8]. Поэтому исследования перенапряжений при дуговых ОЗЗ с учетом влияния разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ, конфигурации сети, места измерения перенапряжений имеют большой интерес.

Наиболее подходящим методом исследования переходных процессов при дуговых ОЗЗ и сопровождающих их перенапряжений является математическое моделирование на ЭВМ. В данной работе для исследования переходных процессов при дуговых ОЗЗ применялся пакет прикладных программ моделирования динамических систем SIMULINK и пакет прикладных программ Power System Blockset моделирования электроэнергетических систем, являющихся компонентами интегрированной системы моделирования MATLAB. Внешний вид имитационной модели распределительной сети для моделирования переходных процессов при дуговых ОЗЗ представлен на рис. 1. Достоверность результатов, полученных с использованием математических моделей, созданных в среде MATLAB, и применяемых методик моделирования дуговых прерывистых ОЗЗ была проверена сопоставлением результатов моделирования с записями цифровых осциллограмм при срабатывании устройств защиты от замыканий на землю на подстанциях.

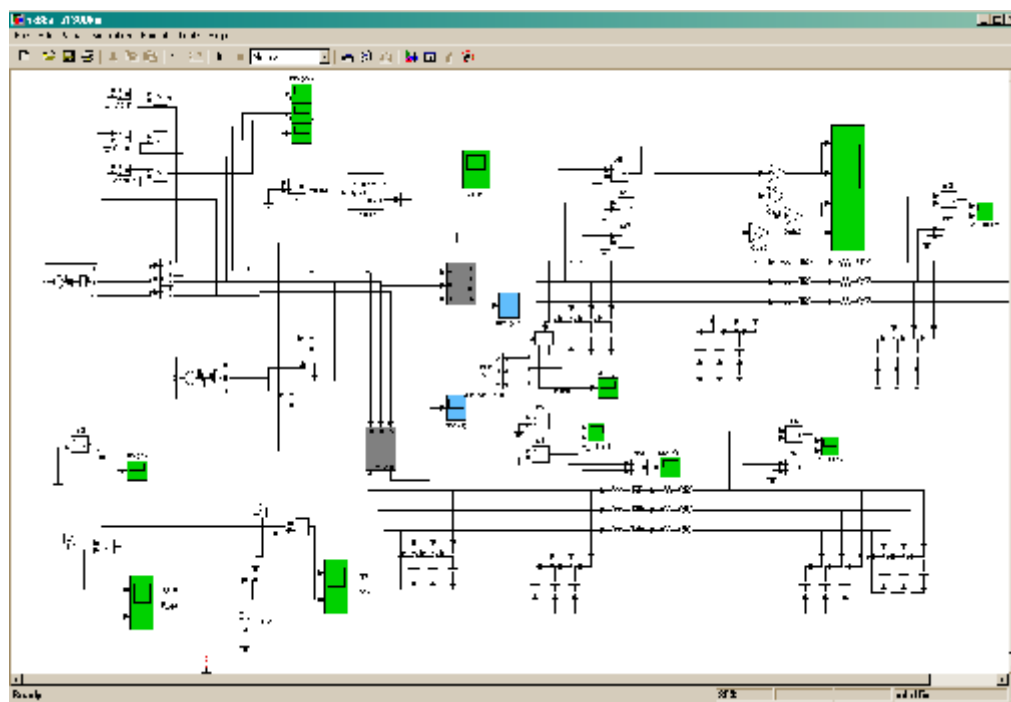


Рис. 1. Внешний вид файла имитационной модели распределительной сети в SIMULINK

Моделирование линий осуществлялось двумя способами. В первом случае линии представлялись распределенными параметрами, во втором – сосредоточенными. Дальнейший анализ показал, что учет распределенного характера параметров линий не приводит к существенным ошибкам в оценке максимальных перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ. Достаточную точность расчетов обеспечивает представление линии

одним П-образным трехфазным звеном (рис. 1). При исследованиях моделировались следующие режимы работы сети:

- 1) режимы заземления нейтрали (изолированная, компенсированная, резонансно-резистивное, резистивное заземление нейтрали);
- 2) место замыкания фазы на землю (на шинах, в середине линий, в конце линий);
- 3) место измерений перенапряжений (на шинах, в месте ОЗЗ, в конце линий).

Результаты исследований

Графическое представление результатов моделирования представлено на рис. 2. Были установлены основные особенности прерывистых ОЗЗ.

1. Максимальные перенапряжения на поврежденной и неповрежденных фазах могут возникать при дуговом пробое изоляции и поледующем гашении заземляющей дуги, в моменты перехода тока через ноль высокочастотной составляющей (характерно для кабельных линий).

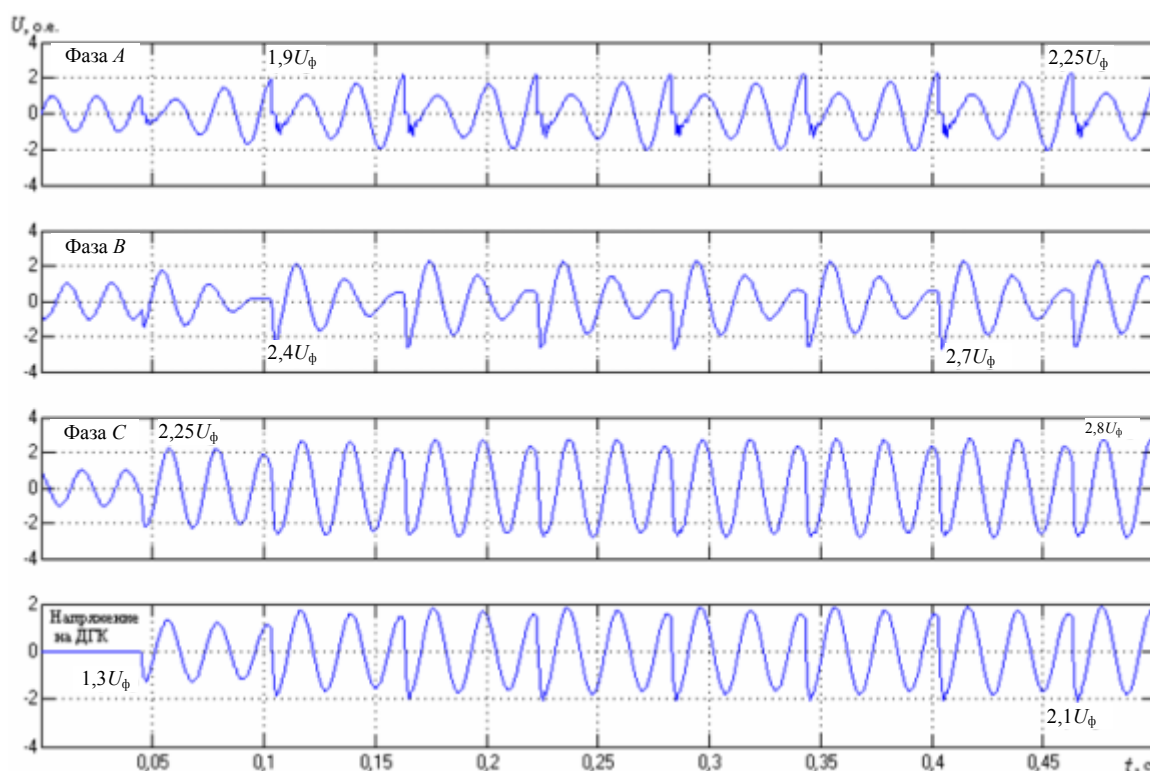


Рис. 2. Многократные замыкания в сети 10 кВ с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор (емкостной ток замыкания на землю 100 А; коэффициент компенсации емкостного тока равен 125 % (перекомпенсация))

2. При дуговых прерывистых ОЗЗ максимальные перенапряжения возникают, как правило, в месте пробоя изоляции. При этом перенапряжения на поврежденной фазе могут достигать значений, примерно равных значениям перенапряжений на неповрежденных фазах. В сетях, работающих с изолированной нейтралью, при ОЗЗ на шинах максимальные кратности перенапряжений соответствуют принимаемым в настоящее время большинством специалистов значению $4,0U_{\phi m}$.

3. При ОЗЗ в удаленных от шин точках сети, работающей с изолированной нейтралью, кратности перенапряжений, измеренных на шинах, на концах линий и в месте ОЗЗ, могут быть значительно больше, достигая значений $6U_{\phi m}$ и более.

4. Резонансное заземление нейтрали через ДГР практически исключает возможность возникновения перенапряжений на поврежденной фазе на шинах (максимальные кратности перенапряжений 1,0–1,15) и ограничивает перенапряжения на неповрежденных фазах на шинах до значений 2,4–2,6 $U_{\phi m}$, что хорошо согласуется с существующими оценками. Расстройки компенсации в пределах $\pm 10\%$ не оказывают существенного

влияния на максимальные перенапряжения, прежде всего в месте повреждения и в конце протяженных кабельных линий.

5. Высокоомное заземление нейтрали через резистор позволяет уменьшить максимальные кратности перенапряжений, измеренные на шинах, на поврежденной фазе до $1,5U_{\phi m}$, на неповрежденных фазах – до $2,4-2,6U_{\phi m}$, что соответствует существующим оценкам.

6. Снижение перенапряжений в сети при относительно небольшой расстройке дугогасящего реактора может быть достигнуто путем применения высокоомного резистора, включенного параллельно ДГР. Применение заземляющего резистора, включенного параллельно ДГК, приводит к прекращению биений и уменьшению перенапряжений до $2,3U_{\phi m}$.

Сравнение различных режимов заземления нейтрали сети 10 кВ по эффективности ограничения перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ приведено ниже.

**Режимы заземления нейтрали сети 10 кВ
по эффективности ограничения перенапряжений при ОЗЗ**

Место ОЗЗ	Место замера перенапряжений	Фаза	Кратность перенапряжений		
			Изолированная нейтраль	Высокоомное заземление нейтрали	Резонансное заземление нейтрали
На шинах	В месте ОЗЗ	A	4,0	1,8	1,16
		B	4,2	2,04	2,2
		C	4,1	2,41	2,3
	В конце линии (0,25 км)	A	5,1	1,5	1,6
		B	5,9	2,13	2,3
		C	5,7	2,52	2,3
В конце линии	На шинах	A	4,6	1,46	1,02
		B	4,62	2,6	2,36
		C	4,52	2,6	2,31
	В конце линии (0,88 км)	A	6,1	1,79	1,33
		B	6,3	2,54	2,36
		C	6,21	2,56	2,3
	В месте ОЗЗ	A	6,3	2	1,46
		B	6,5	2,6	2,3
		C	6,43	2,6	2,3

Заключение

1. На максимальные перенапряжения значительное влияние может оказывать возможность гашения дуги заземляющего тока в моменты перехода через ноль высокочастотной разрядной составляющей переходного тока.

2. Максимальные перенапряжения могут возникать не на шинах, а в месте повреждения или в конце линий.

3. В сетях 6–35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, максимальные кратности перенапряжений на неповрежденных фазах могут быть существенно выше, чем принимается в настоящее время.

4. Применения режима изолированной нейтрали в сетях 6–35 кВ необходимо ограничить, а в кабельных сетях 6–10 кВ в перспективе исключить вообще применение этого режима заземления нейтрали.

5. Высокоомное заземление нейтрали через резистор наиболее эффективно ограничивает перенапряжения на поврежденной и неповрежденных фазах при дуговых прерывистых ОЗЗ во всех точках сети, однако область его возможного применения ограничена сетями с малыми значениями суммарного емкостного тока.

6. Расстройка полной компенсации, в сетях с резонансным заземлением нейтрали, не желательна не только из-за увеличения в месте замыкания составляющей тока промышленной частоты, но она также приводит к двухчастотному переходному процессу при замыканиях на землю. Это вызывает «биения» напряжений. Перенапряжения в поврежденной фазе вследствие «биений» способствуют появлению многократных замыканий на землю в месте пробоя изоляции.

Литература

1. Бохан, А. Н. Особенности моделирования перенапряжений в сетях с ОПН / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок, С. Н. Прохоренко // Наука и производство – 2009 : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., г. Брянск, 19–20 марта 2009 г. – Брянск, 2009.
2. Дударев, Л. Е. Особенности дуговых замыканий фазы на землю в сетях с нейтралью, заземленной через резистор / Л. Е. Дударев, И. В. Волошек // Промышленная энергетика. – 1998. – № 6. – С. 23–29.
3. Евдокунин, Г. А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики) / Г. А. Евдокунин, Г. Тилер. – Санкт-Петербург : Изд-во М. П. Сизова, 2000. – С. 114.
4. Короткевич, М. А. Основные направления совершенствования эксплуатации сетей / М. А. Короткевич. – Минск : Техноперспектива, 2003. – 373 с.
5. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрической сети 6–35 кВ. – Минск, 2004. – С. 46.
6. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – Москва : Энергия, 1974. – С. 152.
7. Бохан, А. Н. Снижение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2004. – № 1. – С. 46–51.
8. Edward Anderson. Single-phase short circuits on the earth in industrial networks and their effects / Edward Anderson, Janusz Karolak, Josef Wisniewski // [Electronic resource]. – The Hague, 2001. – Mode of access : <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2001/eltf/shev~/ellib/article3/index.htm>. Date of access : 04.01.2006.

Получено 10.09.2010 г.